

發明專利說明書

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※ 申請案號：94105593

※ 申請日期：94.2.24

※IPC 分類：G02B 6/10

一、發明名稱：(中文/英文)

雙抗諧反射光波導馬赫任德干涉式感測器

Dual-ARROW Mach-Zehnder Interferometric Sensors

二、申請人：(共 1 人)

姓名或名稱：(中文/英文)

國立交通大學

代表人：(中文/英文) 黃威

住居所或營業所地址：(中文/英文)

新竹市大學路 1001 號

國 籍：(中文/英文) 中華民國 TW

三、發明人：(共 2 人)

姓 名：(中文/英文)

1. 許世欣

2. 黃遠東

國 籍：(中文/英文)

1. 中華民國 TW

2. 中華民國 TW

四、聲明事項：

主張專利法第二十二條第二項 第一款或 第二款規定之事實，其事實發生日期為：94 年 1 月 13 日。

申請前已向下列國家（地區）申請專利：

【格式請依：受理國家（地區）、申請日、申請案號 順序註記】

有主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

無主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

主張專利法第二十九條第一項國內優先權：

【格式請依：申請日、申請案號 順序註記】

主張專利法第三十條生物材料：

須寄存生物材料者：

國內生物材料 【格式請依：寄存機構、日期、號碼 順序註記】

國外生物材料 【格式請依：寄存國家、機構、日期、號碼 順序註記】

不須寄存生物材料者：

所屬技術領域中具有通常知識者易於獲得時，不須寄存。

五、中文發明摘要：

本發明之雙抗諧振反射光波導 (ARROW) 馬赫任德干涉式感測器的用途在偵測外在環境的折射率變化，以供化學和生化感測之用。此一感測元件係由分光區域、感測區域及合光區域等三個區域構成，其中分光與合光區域的結構為具高耦合效率的雙抗諧振反射光波導，而感測區域則是不耦合之雙抗諧振反射光波導。藉由調整結構之對稱性以控制其耦合行為，可達成小巧且不使用彎折結構之積體化馬赫任德干涉式感測器。

六、英文發明摘要：

Mach-Zehnder interferometer (MZI) sensors based on dual ARROW (antiresonant reflecting optical waveguide) are proposed for chemical and/or biochemical sensing. The sensor consists of three sections. The first and third sections are coupling dual ARROW structures for splitting and recombining light waves. The second section, the sensing section, is a decoupled dual ARROW. By adjusting the degree of structural symmetry to control the coupling behavior of the dual ARROW, integrated optical interferometric sensors without any bending structures are realized.

七、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第(三)圖。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

- 30 : 感測環境
- 311 : 第一低折射率隔離層
- 312 : 第二低折射率隔離層
- 313 : 第三低折射率隔離層
- 321 : 第一高折射率隔離層
- 322 : 第四高折射率隔離層
- 331 : 上核心層
- 332 : 下核心層
- 341 : 第二高折射率隔離層
- 342 : 第三高折射率隔離層
- 35 : 基底

八、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

九、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

積體光學感測元件 (integrated optical sensors) 因具有感測靈敏度 (sensitivity) 高、體積小、不受電磁干擾 (electromagnetic interference, EMI) 影響等特性, 近年來益加廣泛應用於化學與生化感測, 而藉由運用標準 IC 製程技術, 積體光學感測元件不僅提供了在單一晶片上多種感測元件同時進行多項檢測的可能性, 也深具將光學與電子元件積體化以組成智慧型感測系統 (smart sensors system) 的潛力^[1,2]。

在多種光學感測架構中, 干涉式感測器 (interferometric sensors) 如麥克森 (Michelson)、法布里珀羅 (Fabry-Pérot)、馬赫任德 (Mach-Zehnder) 等型式的干涉架構, 因係檢測光波於通過感測區域所獲致之相位變化 (phase change), 本質上具有較高的感測靈敏度而廣為各界採用, 其中又以馬赫任德式最受歡迎, 主要的原因便在於其設計和製作簡單, 且參考臂 (reference arm) 的存在也有助於補償共模效應 (common-mode effect)^[3-5]。

【先前技術】

傳統的積體化 (integrated) 馬赫任德干涉器 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 通常包含兩個背對背的分光器 (splitter) 與合光器 (combiner), 兩者由一對彼此分離而互不影響的單模直線型波導 (single-mode straight waveguide) 相連, 依其分光、合光器的結構可概略區分為對稱式 Y 型分叉 (symmetric Y-junction) 與方向耦合器 (directional coupler) 等兩種型式, 分別如圖一、圖二所示。

在馬赫任德干涉式感測器中, 輸入的同調光波 (coherent light wave) 會被均分至兩通道, 其中一通道 (感測臂, sensing arm) 的部分區域 (作用區域, interaction area) 暴露於外在環境一段距離 (作用長度, interaction length), 而另一通道 (參考臂) 則與外在環境隔絕。傳播於感測臂的感測光波 (sensing wave) 於作用長

度內因與外在環境的交互作用，隨外在環境變化產生了一相位變化或相位移（phase shift）：

$$\Delta\phi = k_0\Delta n_{eff}L \quad (1)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 為真空中的波數（wavenumber）， Δn_{eff} 為波導模態之等效折射率（effective index）因外在環境變化產生的改變， L 則為作用長度。當來自兩通道的光訊號抵達輸出端時，兩訊號干涉產生的輸出光能量為相位變化的正弦或餘弦函數。具對稱式 Y 型分叉分光、合光器之馬赫任德干涉式感測器僅有一個輸出端，當兩通道光訊號的相位差為 π 的奇數倍時，能量將耦合至輻射模（radiation mode）而散逸至周遭；但對具有方向耦合器式分光、合光器之馬赫任德干涉式感測器（圖二）來說，因能量不會散逸至輻射模，兩輸出光能量之和可作為輸入光能量的監視之用，其正規化（normalized）輸出光能量可表示成：

$$P_1/P_0 = \sin^2(\Delta\phi/2) \quad (2)$$

$$P_2/P_0 = \cos^2(\Delta\phi/2) \quad (3)$$

其中 P_0 為輸入光能量。由於前述之相位變化對應於外在環境光學性質（如折射率）的改變，便可藉由量測輸出光能量的變化，來偵測外在環境的改變。

從上述討論與干涉式感測器的工作原理可以得知，感測臂的作用長度愈長，感測光波與外在環境的交互作用愈明顯，相位變化也愈大，感測靈敏度便愈高，但感測元件的尺寸也會隨之增大；另一方面，為確保連接分光、合光器的兩直線型波導彼此獨立互不影響，兩波導間須保有相當寬廣之間距，以致於積體化馬赫任德干涉式感測器往往需要相當長的彎折結構（bending structure）來達成將光訊號一分為二或二合為一。因此，兩直線型波導之間距與不易縮短的彎折結構，都限制了傳統積體化馬赫任德干涉式感測器進一步微小化或提高感測靈敏度的能力。

【發明內容】

有鑑於前述之傳統積體化馬赫任德干涉式感測器在微縮方面的限制，本發明乃提出一種雙抗諧振反射光波導（antiresonant reflecting optical waveguide, ARROW）馬赫任德干涉式感測器^[6]，可藉由調整波導結構之對稱性來控制其耦合行為，達成小巧且不須使用任何彎折結構之積體化馬赫任德干涉式感測器，以偵測外在環境（即待測物）的折射率變化，供化學與生化感測之用。

抗諧振反射光波導係一種新型的光波導結構^[7]，近十餘年來經廣泛探討、研究，已被驗證具有許多獨特的優點，如：低損耗單模傳輸、可配合輸入或輸出光纖彈性地選擇光波導多層結構的厚度與材料折射率，以達到最高的輸入或輸出耦合效率（input/output coupling efficiency）。此外，由兩平行抗諧振反射光波導組成的雙抗諧振反射光波導（dual ARROW），又可彈性地設計兩個波導間隔離層（cladding）的厚度，而不改變其耦合效率及耦合長度（coupling length），因而得以設計出遠距耦合器（remote coupler）。根據過去的研究^[8]，雙抗諧振反射光波導架構之方向耦合器的最高耦合效率（maximum coupling efficiency），可由波導結構之對稱性來控制（如利用最外側隔離層的厚度來控制），其最高耦合效率可控制在 0 至 100% 的範圍內。本發明即利用此一原理，設計出以雙抗諧振反射光波導為基本架構的馬赫任德干涉式感測器。

本發明提出之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，可藉由控制最外側隔離層的厚度，調整波導結構之對稱性，以形成一分光區域、一感測區域及一合光區域。其中，分光區域及合光區域之結構具有高對稱性，使雙抗諧振反射光波導於此兩區域內具有高耦合效率；而感測區域之結構具有極低之對稱性，使雙抗諧振反射光波導於感測區域內之最高耦合效率趨近於 0。

上述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器中，其結構由上而下分別為一第一低折射率隔離層、一第一高折射率隔離層、一第一抗諧振反射光波導核心層（上核心層，upper core）、一第二高折射率隔離層、一第二低折射率隔離層、一第三高折射率隔離層、一第二抗諧振反射光波導核心層（下核心層，lower core）、

一第四高折射率隔離層、一第三低折射率隔離層，與一基底。

【實施方式】

本發明之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器的結構如圖三所示，本質上為一具有兩核心層（core）之雙抗諧振反射光波導，其多層結構包含最外側之低折射率隔離層、一高折射率隔離層、第一抗諧振反射光波導核心層（上核心層）、一高折射率隔離層、一低折射率隔離層、一高折射率隔離層、第二抗諧振反射光波導核心層（下核心層）、一高折射率隔離層、一低折射率隔離層，與一基底。依其運作原理與功能，其架構可分為分光區域、感測區域及合光區域等三個區域，皆為雙抗諧振反射光波導結構，僅最外側隔離層之厚度不同，其中分光與合光區域的結構為具有高耦合效率的雙抗諧振反射光波導，以作為將光訊號一分為二與二合為一的3分貝耦合器（3-dB coupler）之用；而感測區域則是不耦合（decoupled）之雙抗諧振反射光波導，其兩核心層分別作為感測臂與參考臂之用。

當輸入光波由分光區域之任一核心層導入，依據波導結構之模態分析，僅有兩個具有低傳輸損耗的橫向電場（transverse electric, TE）模態會被高效率激發並主導後續光波的傳播，其模態場分布（modal field distribution）如圖四（a）所示，其餘模態或因傳輸損耗遠高於前兩者，或因無法被有效激發，其影響相對輕微。由於分光區域具有高度對稱的結構，其最高耦合效率相當接近100%，經過半個耦合長度的傳播後，能量被平均分配至兩核心層，並由此進入感測區域。

於感測區域內，因其最外側隔離層被完全剝離，成為不對稱之雙抗諧振反射光波導（最高耦合效率趨近於0），於兩核心層內傳播之光波便彼此獨立、互不影響，其模態場分布如圖四（b）所示。其中傳播於感測臂（上核心層）的感測光波之模態場分布與外在環境接近，藉由衰減波（evanescent wave）與待測物的交互作用，使其等效折射率隨待測物光學性質（如折射率）的變化而發生改變；而傳播於參考臂（下核心層）的參考光波（reference wave）

因遠離待測物，則幾乎不受待測物變化的影響。

當光波通過具有高度對稱性結構、耦合效率接近 100% 的合光區域（結構參數與分光區域完全相同），來自兩通道的訊號干涉產生出能量隨相位變化呈正弦或餘弦函數變化的輸出光波，如(2)、(3)式所述，由於感測器與具方向耦合器式分光、合光器之馬赫任德干涉式感測器同樣有兩輸出通道，其輸出光能量之和還可作為監視輸入光能量變化之用。藉由量測輸出光能量的變化，可萃取出相位變化 $\Delta\phi$ ，並偵測出待測物的改變 Δn_a 。

與傳統之積體化馬赫任德干涉式感測器相較，本發明之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器不僅能免去相當長的彎折結構，提供進一步將元件微縮的能力外，還可依據不同的感測靈敏度或輸出耦合條件的要求，運用抗諧振反射光波導可彈性選擇光波導層厚度與材料折射率的特性，設計出所需的感測元件。

本發明之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器的實施例係針對水中環境（折射率約為 1.332）感測而設計。首先依應用需求選定搭配所用光波之工作波長的波導材料系統，亦即雙抗諧振反射光波導核心層折射率與厚度，例如本實施例之工作波長為 $0.6328 \mu\text{m}$ ，選定之上、下核心層材料為二氧化矽（ SiO_2 ），其折射率為 1.46，厚度則定為 $4 \mu\text{m}$ ，以便能與單模光纖高效率耦合。其次依據抗諧振條件（antiresonance condition）來設計除最外側高/低折射率隔離層外其餘各高/低折射率隔離層的厚度 d_j ：

$$d_j = \frac{\lambda_0}{4n_j} \cdot \left[1 - \left(\frac{n_g}{n_j} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{2n_j d_g} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot (2Q_j + 1), \quad Q_j = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

其中 n_g 與 d_g 為已選定的雙抗諧振反射光波導核心層之折射率與厚度， n_j 表示各高/低折射率隔離層的折射率，其數值可依感測元件需要選定適當材料，如氮化矽（ Si_3N_4 ）、氮氧化矽（ SiO_xN_y ）、二氧化鈦（ TiO_2 ）等。至於最外側高/低折射率隔離層的厚度，在具高耦合效率的分光與合光區域，其厚度須滿足上述之抗諧振條件，並依據耦合效率分析的結果（圖五）選定最高耦合效率接近 100% 者；而在不耦合的感測區域，最外側低折射率隔離層須完

全剝除（即厚度為 0），且最外側高折射率隔離層的厚度也須適當削減，以進一步破壞結構之對稱性，使最高耦合效率趨近於 0，並提升感測光波與待測物的交互作用。

依據前述說明，本發明較佳實施例之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器的各層材料與折射率為：水（感測環境）30 的折射率為 1.332；最外側低折射率隔離層 311 為二氧化矽，折射率為 1.46；最外側高折射率隔離層 321 為氮化矽，折射率 2.00；上核心層 331 為二氧化矽，折射率 1.46；高折射率隔離層 341 為氮氧化矽，折射率 1.60；低折射率隔離層 312 為二氧化矽，折射率 1.46；高折射率隔離層 342 為氮氧化矽，折射率 1.60；下核心層 332 為二氧化矽，折射率 1.46；高折射率隔離層 322 為氮化矽，折射率 2.00；低折射率隔離層 313 為二氧化矽，折射率 1.46；矽基底 35 的折射率為 3.85。

由於上核心層 331 與下核心層 332 的厚度已選定為 4 μm ，各層的厚度可依據前述之抗諧振條件求得：低折射率隔離層 312、313 的厚度為 2 μm ；高折射率隔離層 322 的厚度為 0.116 μm ；高折射率隔離層 341、342 的厚度為 0.24 μm 。至於最外側隔離層，依據耦合效率分析的結果（圖五），於分光、合光區域內，低折射率隔離層 311 的厚度為 1.83 μm ，高折射率隔離層 321 的厚度為 0.116 μm ，以達成大於 99.98% 之最高耦合效率；於感測區域內，低折射率隔離層 311 的厚度降為 0，高折射率隔離層 321 的厚度則為 0.030 μm ，其最高耦合效率低於 0.01%。基於上述結構參數，分光、合光區域的長度為 4.06 mm，感測區域的長度（即作用長度 L ）為 15 mm，元件總長度為 23.12 mm。

圖六為運用特徵模傳播分析（eigenmode propagation analysis）所得之正規化輸出光能量 P_1 及 P_2 與待測物折射率變化之關係圖，兩通道輸出光能量之和 P_1+P_2 低於 1 係因部分能量於不連續界面處耦合至輻射模或高傳輸損耗模態。圖七為相位變化與待測物變化之關係圖，圖中黑色實線之斜率即為本較佳實施例之感測靈敏度 $\Delta\phi/\Delta n_a$ ，經計算於水中環境（折射率 1.332）的感測靈敏度約為 $676 \cdot (2\pi)$ ，以一般相位檢測方法的相位解析度（phase resolution）

約為 $0.01 \cdot (2\pi)$ ，本實施例可偵測出小至 1.48×10^{-5} 的折射率變化。

【檢索資料】

1. P. V. Lambeck, "Integrated opto-chemical sensors," *Sensors and Actuators B*, vol. 8, pp. 103-116, 1992.
2. B. J. Luff, R. D. Harris, J. S. Wilkinson, R. Wilson, and D. J. Schiffrin, "Integrated-optical directional coupler biosensor," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 618-620, Apr. 1996.
3. E. F. Schipper, A. M. Brugman, C. Domínguez, L. M. Lechuga, R. P. H. Kooyman, and J. Greve, "The realization of an integrated Mach-Zehnder waveguide immunosensor in silicon technology," *Sensors and Actuators B*, vol. 40, pp. 147-153, May 1997.
4. B. J. Luff, J. S. Wilkinson, J. Piehler, U. Hollenbach, J. Ingenhoff, and N. Fabricius, "Integrated optical Mach-Zehnder biosensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, pp. 583-592, Apr. 1998.
5. F. Prieto, B. Sepúlveda, A. Calle, A. Llobera, C. Domínguez, and L. M. Lechuga, "Integrated Mach-Zehnder interferometer based on ARROW structures for biosensor applications," *Sensors and Actuators B*, vol. 92, pp. 151-158, July 2003.
6. S.-H. Hsu and Y.-T. Huang, "A novel Mach-Zehnder interferometer based on dual ARROW structures for sensing applications," *The Eighth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT2005)*, Tokyo, Japan, Jan. 2005.
7. M. A. Duguay, Y. Kokubun, T. L. Koch, and L. Pfeiffer, "Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO_2 -Si multilayer structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, pp. 13-15, Jan. 1986.
8. Y.-H. Chen and Y.-T. Huang, "Coupling efficiency analysis and control of dual antiresonant reflecting optical waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 1507-1513, June 1996.

【圖式簡單說明】

圖一為習知的具有對稱式 Y 型分叉分光、合光器之馬赫任德干涉式感測器的示意圖；

圖二為習知的具有方向耦合器式分光、合光器之馬赫任德干涉式感測器的示意圖；

圖三為本發明之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器的結構示意圖；

圖四 (a) 為分光區域內兩主要橫向電場 (TE) 模態之模態場分布圖；

圖四 (b) 為感測區域內兩主要橫向電場 (TE) 模態之模態場分布圖；

圖五為最高耦合效率與最外側隔離層厚度之關係圖；

圖六為正規化輸出光能量與待測物折射率之關係圖；

圖七為相位變化與待測物折射率之關係圖。

【主要元件符號說明】

- 30 : 感測環境
- 311 : 第一低折射率隔離層
- 312 : 第二低折射率隔離層
- 313 : 第三低折射率隔離層
- 321 : 第一高折射率隔離層
- 322 : 第四高折射率隔離層
- 331 : 上核心層
- 332 : 下核心層
- 341 : 第二高折射率隔離層
- 342 : 第三高折射率隔離層
- 35 : 基底

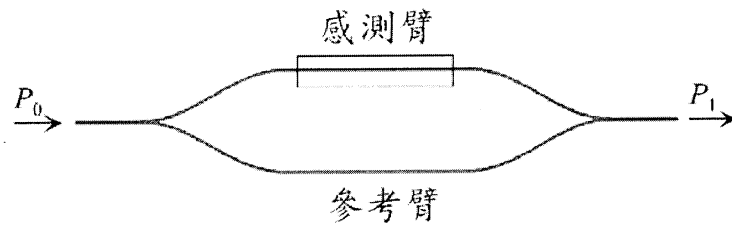
十、申請專利範圍：

1. 一種雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其包含有一雙抗諧振反射光波導，該雙抗諧振反射光波導係藉由不同之外隔離層厚度，以形成一分光區域、一感測區域及一合光區域。
2. 如申請專利範圍第 1 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該分光區域及該合光區域之外隔離層厚度係大於該感測區域之外隔離層厚度。
3. 如申請專利範圍第 1 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該分光區域及該合光區域之結構係具有高對稱性，使該雙抗諧振反射光波導於此兩區域內具有高耦合效率。
4. 如申請專利範圍第 1 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該感測區域之結構具有低對稱性，使該雙抗諧振反射光波導於此感測區域內具有低耦合效率。
5. 如申請專利範圍第 1 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該分光區域及該合光區域之長度係等於該雙抗諧振反射光波導之耦合長度 (coupling length) 的一半。
6. 如申請專利範圍第 1 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該雙抗諧振反射光波導係設計成只容許兩個模態 (mode) 能被有效率激發並具有低傳輸損耗。
7. 如申請專利範圍第 1 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該雙抗諧振反射光波導之結構由上而下分別為一第一低折射率隔離層、一第一高折射率隔離層、一上核心層、一第二高折射率隔離層、一第二低折射率隔離層、一第三高折射率隔離層、一下核心層、一第四高折射率隔離層、一第三低折射率隔離層，與一基底。
8. 如申請專利範圍第 7 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該雙抗諧振反射光波導之該上核心層與該下核心層的折射率及尺寸係可與一光纖匹配 (match)，以產生高之輸入或輸出耦合效率 (input/output coupling efficiency)。
9. 如申請專利範圍第 7 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干

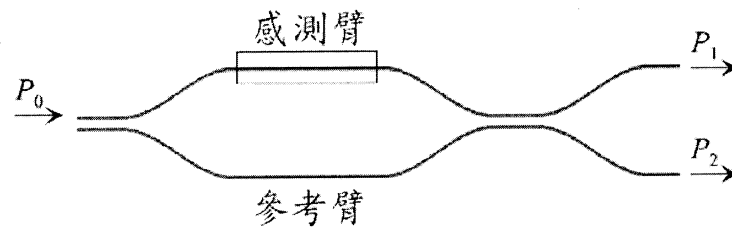
涉式感測器，其中該感測區域中之該第一低折射率隔離層的厚度為零，且其該第一高折射率隔離層之厚度設計為使得該感測區域之耦合效率趨近於零。

10. 如申請專利範圍第 7 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該分光區域及該合光區域之各隔離層的厚度係由抗諧振條件（antiresonance condition）決定。
11. 如申請專利範圍第 7 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該上核心層與該下核心層之材料為二氧化矽。
12. 如申請專利範圍第 7 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該雙抗諧振反射光波導結構之各低折射率隔離層的材料為二氧化矽。
13. 如申請專利範圍第 7 項所述之雙抗諧振反射光波導馬赫任德干涉式感測器，其中該雙抗諧振反射光波導結構之各高折射率隔離層的材料可選自氮化矽、氮氧化矽、二氧化鈦等。

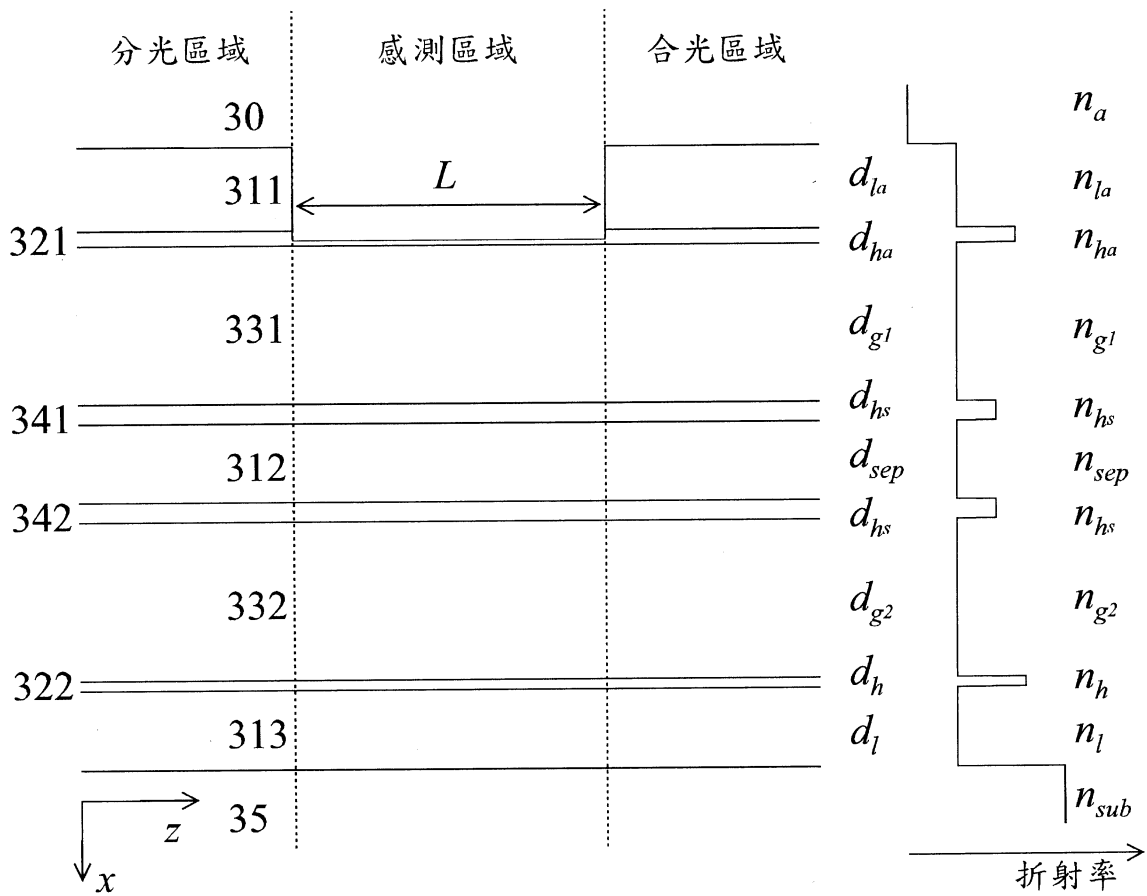
十一、圖式：



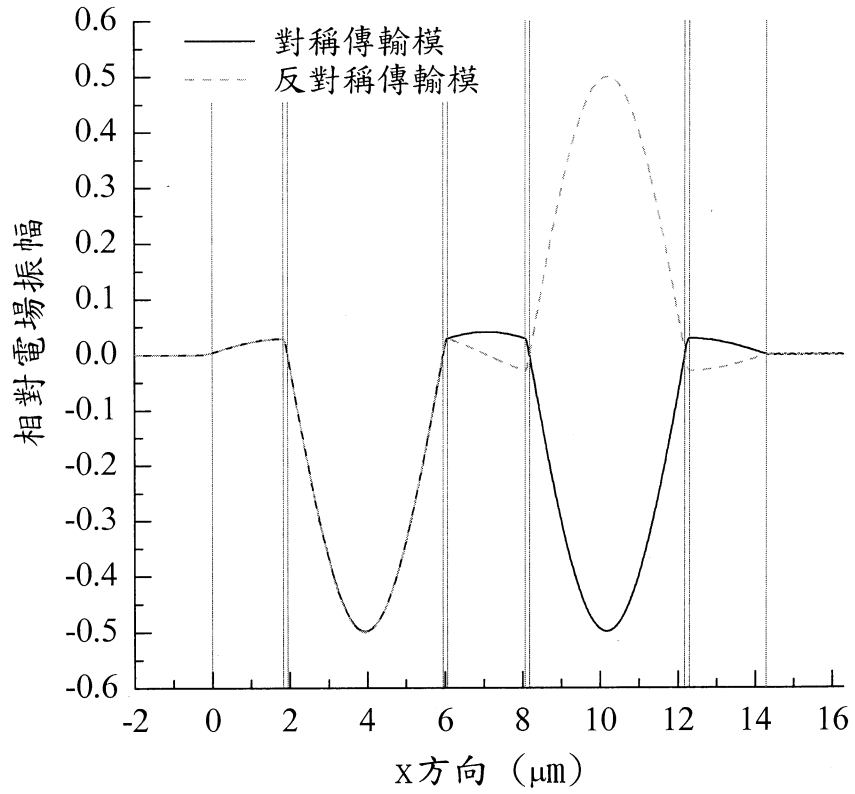
圖一



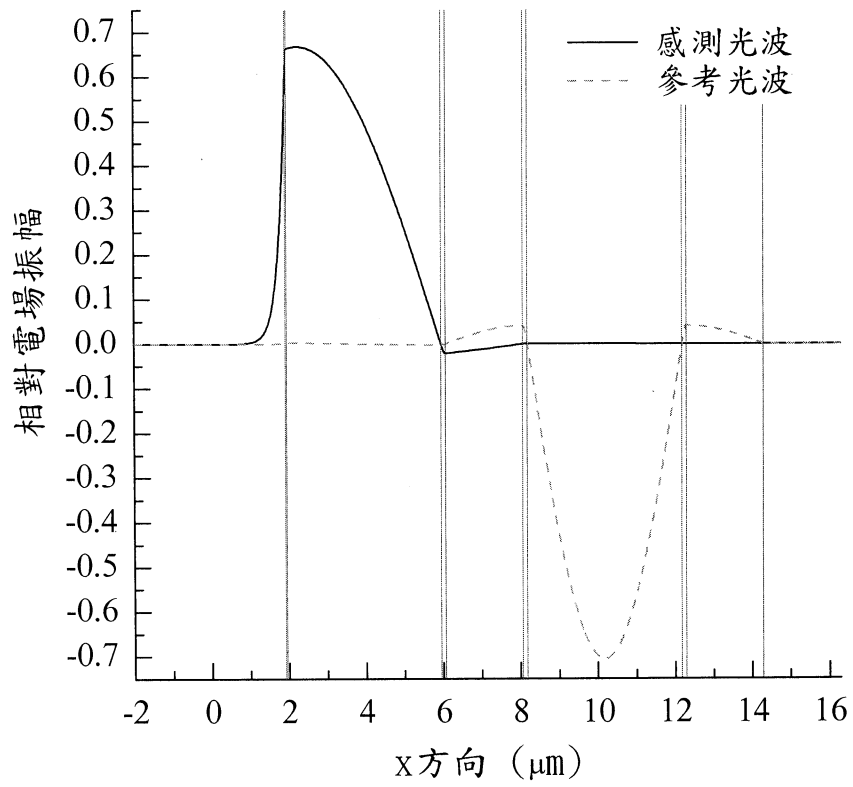
圖二



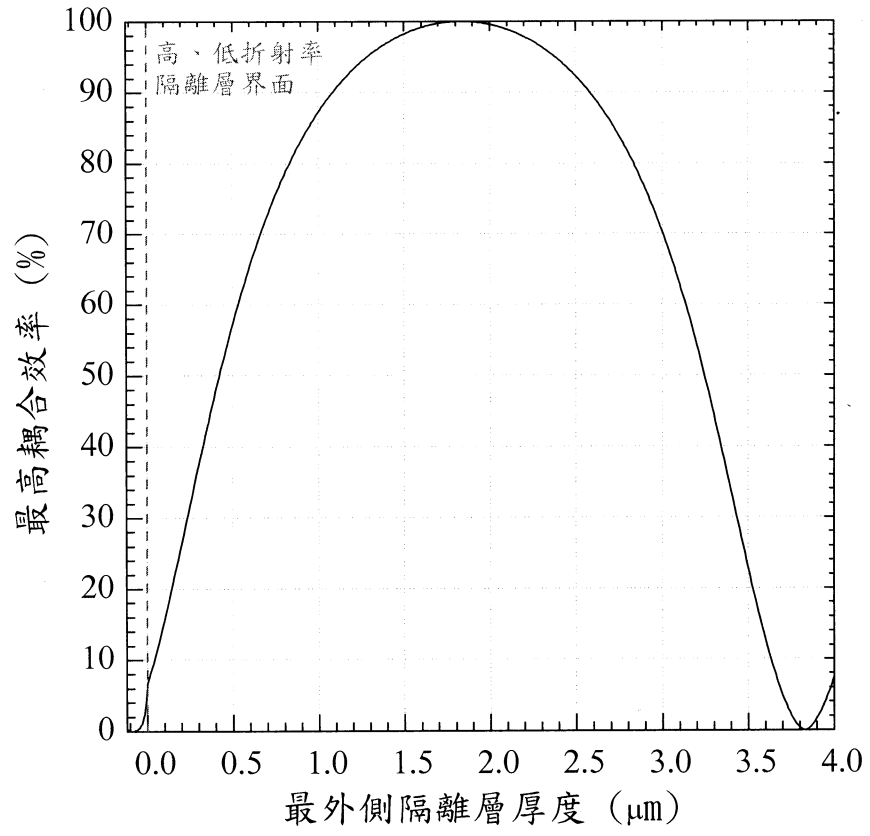
圖三



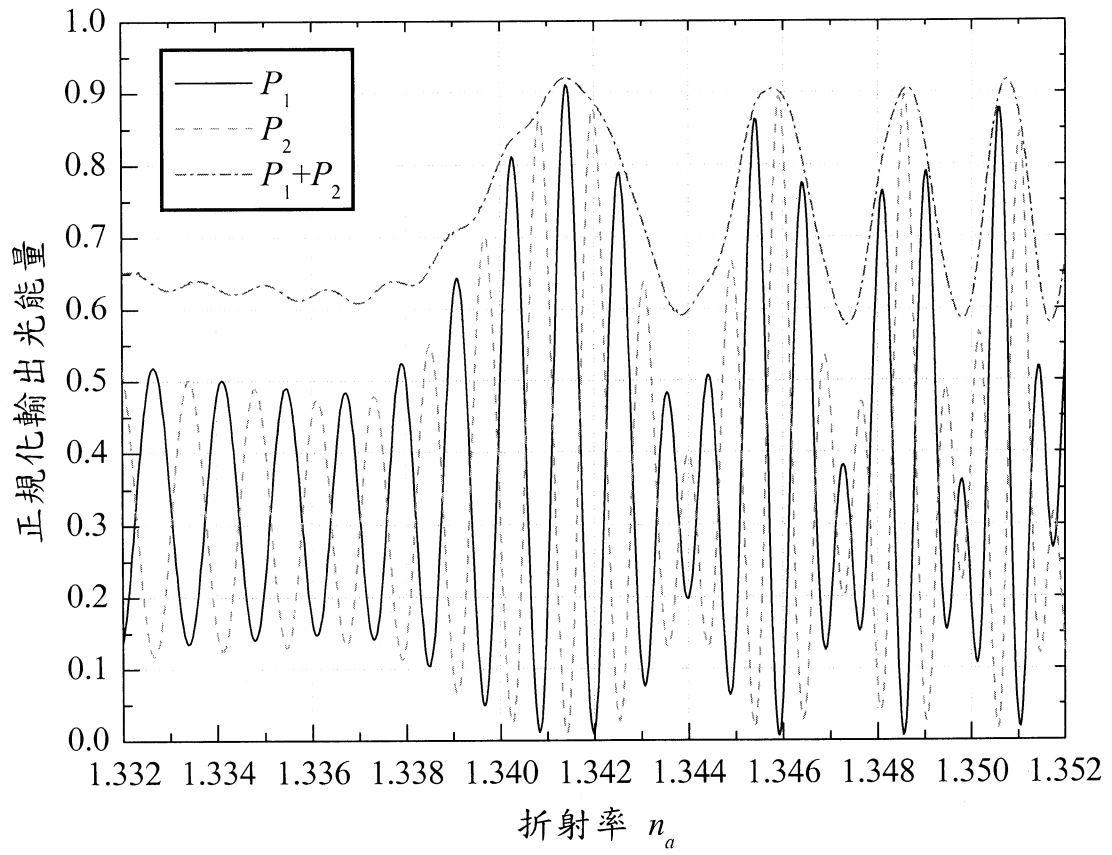
圖四 (a)



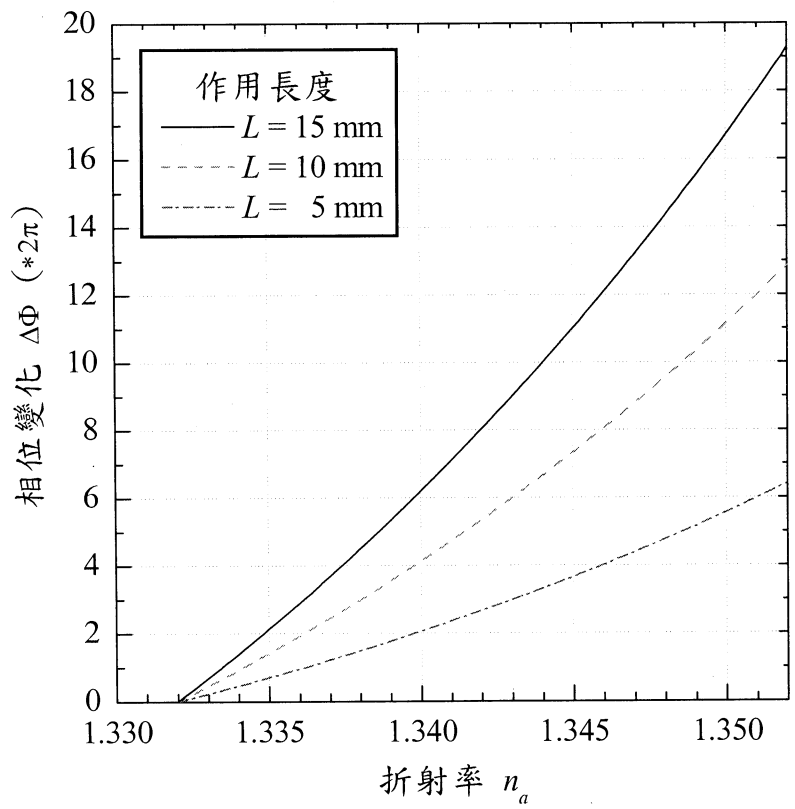
圖四 (b)



圖五



圖六



圖七